

Ce phénomène semble en tout cas très localisé dans le temps et dans l'espace, ce qui n'empêche pas une partie de la mouvance climato-sceptique de sauter sur l'occasion pour jeter le bébé avec l'eau du bain, ou pour diffamer Phil Jones, *via* le retentissant Climategate, en prêtant une signification erronée à ses propos de chercheur. Il y a aussi d'autres données dans la courbe de Mann, notamment les données isotopiques issues des sédiments lacustres, des carottes de glace, etc. C'est l'ensemble de ces données indirectes qui, passant par une moulinette de calibration et d'homogénéisation, nous permet de remonter dans le temps et de fournir une reconstitution d'un indicateur comme la température moyenne pour une portion du globe sur plusieurs siècles, avec toutes les limites que l'exercice comporte bien sûr en termes de couverture spatiale ou temporelle, ou en termes de précision.

Isabelle: Et est-ce que tous ces proxies convergent vers une même indication concordante de température?

Jérôme: Il y a beaucoup de bruit, qui est dû à l'imprécision de l'enregistrement en question. Par exemple, lorsque l'on mesure l'épaisseur d'un anneau d'arbre, cette mesure reflète-t-elle une température moyenne annuelle ou une température de la période de croissance, ou plutôt un effet lié à l'hydrologie, aux conditions de stress hydrique vécu par l'arbre? Il y a donc une incertitude sur le lien entre un paramètre physique ou biologique et le proxy, mais également sur sa résolution temporelle – si on reprend l'exemple des températures mesurées dans un sol, ce n'est pas avec ce type de mesures qu'on va pouvoir déterminer s'il y a eu un optimum médiéval ou un petit âge de glace à une certaine époque à cet endroit, hormis dans la glace du Groenland.

Il y a également le problème de la résolution spatiale: la couverture spatiale de ces proxies n'est pas équivalente à celle que l'on a aujourd'hui avec les stations météo, elles-même ayant eu d'ailleurs une couverture spatiale évolutive au cours du xx^e siècle. Donc derrière ces proxies, il y a tout un travail de statistiques pour reconstituer une courbe à la manière de Michael Mann. La synthèse du 4^e rapport du GIEC en présente d'ailleurs une petite dizaine issue de travaux de plusieurs équipes au niveau mondial, et pas seulement ceux de Mann

et de ses collègues. Et il y a effectivement des disparités: toutes les reconstitutions n'aboutissent pas exactement aux mêmes courbes. Mais la tendance de l'ensemble des reconstitutions montre bien que la période la plus récente présente un réchauffement inhabituel au moins pour l'hémisphère Nord. Cela dit, l'évaluation de l'impact des gaz à effet de serre d'origine anthropique sur le climat récent ne repose pas uniquement sur ces courbes devenues symboliques et décriées par certains, contrairement à ce que veut faire croire une minorité de climato-sceptiques.

La subtile corrélation entre la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et la température moyenne à la surface de la Terre

Isabelle: Les reconstitutions de températures fondées sur différents indicateurs climatiques, les fameux proxies, permettent d'obtenir des courbes de température, mais également des courbes de composition de l'atmosphère, et notamment celle des gaz à effet de serre. Est-ce que l'on peut voir si dans le passé il y a eu des périodes marquées par une corrélation entre la teneur en gaz à effet de serre et l'augmentation de température moyenne de la Terre?

Jérôme: C'est effectivement ce qu'on a montré avec les carottes de glace. En fait, il y a deux interprétations habituelles de cette observation: la première – trop simpliste – est que si l'on voit effectivement une corrélation, c'est qu'il y a une relation de cause à effet dans le sens où les gaz à effet de serre seraient responsables du réchauffement; la deuxième consiste à dire que l'évolution naturelle du climat, due à d'autres facteurs, impacte les cycles biogéochimiques des gaz à effet de serre, mais sans conséquences sur le climat. La réalité est à mi-chemin: on a affaire ici à ce que l'on appelle une rétroaction. La modification du climat entraîne une réponse du cycle biogéochimique qui se traduit par un accroissement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre, entraînant à son tour un réchauffement plus important.

Le phénomène se poursuit jusqu'à atteindre un nouvel équilibre. On passe de conditions glaciaires à des conditions interglaciaires, et *vice versa*.

C'est un peu le même phénomène pour une autre rétroaction importante : celle de l'albédo de la Terre, c'est-à-dire la proportion d'énergie renvoyée par la surface vers l'espace, modulée principalement par l'étendue de neige, de glace continentale et de glace de mer, mais aussi par le type de végétation recouvrant les continents.

La relation à double sens entre le climat et la teneur en gaz à effet de serre trouve ses limites pour un gaz comme le méthane. L'évolution du méthane atmosphérique colle merveilleusement bien à celle de la température au Groenland. On serait tenté d'en déduire que la température du Groenland est modulée par les teneurs en méthane... mais en prenant une sensibilité climatique moyenne, le méthane ne contribue qu'à une augmentation de 0,1 °C de la température moyenne à la surface du globe. Donc ce n'est pas avec cette corrélation que l'on va expliquer les 10 ou 15 °C de réchauffement du Groenland pendant des événements climatiques rapides.

En revanche, pour le CO₂, il y a bien un impact significatif parce que son forçage radiatif est bien plus important que celui du méthane lors des déglaciations.

Dans le contexte actuel, il faut bien comprendre que le rôle du CO₂ est différent : du statut de rétroaction, il est passé à celui de forçage. Si la teneur en CO₂ augmente aujourd'hui dans l'atmosphère, ce n'est pas parce que le climat se réchauffe, mais parce que les activités humaines extraient du combustible fossile (qui n'est jamais que du CO₂ atmosphérique capté par la photosynthèse durant des millions d'années, puis enfoui et transformé en pétrole, gaz et charbon) et le brûlent en le retransformant en CO₂. Même si nos observations dans le passé suggèrent qu'avec un climat plus chaud, on aura aussi plus de CO₂ dans l'atmosphère par effet de rétroaction.

Un des contre-arguments que l'on entend souvent aujourd'hui consiste à dire que, dans les carottes de glace, l'augmentation du CO₂ démarre après l'augmentation de la température, et que le CO₂ ne peut donc pas avoir contribué au réchauffement naturel.

Dans le contexte actuel, il faut bien comprendre que le rôle du CO₂ est différent : du statut de rétroaction, il est passé à celui de forçage.

Il est exact que si on prend une carotte de glace en Antarctique, qu'on reconstitue l'évolution de la température sur ce site à partir des proxies de température, qu'on prend la quantité de CO₂ dans l'atmosphère piégée dans la même carotte de glace et qu'on lui applique la correction nécessaire pour son âge – il y a une différence d'âge entre la température et le CO₂ enregistrés à une même profondeur, car le gaz est piégé dans les bulles à une centaine de mètres de profondeur dans la glace, donc il faut faire une correction et intégrer l'incertitude liée à cette correction –, on arrive à un décalage de 800 ans, plus ou moins 600 ans. Alors oui, à chaque déglaciation que l'on a pu étudier, le CO₂ démarre avec un peu de retard par rapport à la température en Antarctique, et on s'y attend puisque ce n'est pas le facteur déclencheur : il a fallu qu'il se passe quelque chose, notamment au niveau de la circulation océanique, pour que du CO₂ commence à être relâché dans l'atmosphère sous l'effet d'un autre forçage, en l'occurrence les variations des paramètres orbitaux de la Terre. Mais ce que l'on voit après ces 800 ans, c'est qu'il y a encore de 5 000 à 10 000 ans de réchauffement pendant lesquels le CO₂ augmente aussi. Et c'est cet aspect qui est complètement escamoté dans la discussion. Le fait que la teneur en CO₂ dans l'atmosphère augmente avec un léger retard par rapport à l'augmentation de la température ne signifie pas que le CO₂ ne joue aucun rôle dans le réchauffement climatique.

Hervé : C'est vrai que personne ne s'attendait à autre chose concernant le retard au démarrage de l'augmentation de CO₂. Mais il y a un problème de communication sur ce point : d'une part, la voix des scientifiques est souvent simplifiée à l'extrême, ce qui fausse parfois le discours, et d'autre part certains médias préfèrent faire passer des messages où l'on présente une superposition des deux courbes – évolution du CO₂ et de la température moyenne à la surface de la Terre – qui montre la corrélation entre les deux. Et on laisse penser que cette corrélation vaut causalité ; c'est notamment le cas dans le film d'Al Gore. Après avoir laissé circuler ce type d'information, faire passer le message que les scientifiques n'ont jamais dit que ces courbes démontraient une causalité est difficile, parce qu'ils n'ont pas protesté vigoureusement pour dire que c'était absolument faux.

C'est vrai que collectivement, on a une responsabilité sur ce point, d'autant plus que les idées fausses circulent rapidement et qu'elles ont la peau dure.

Sylvestre : À *Libération* récemment, il y avait de la place pour un petit schéma dans l'un de mes papiers sur le climat et un graphiste me proposait en toute bonne foi de mettre le schéma superposant les courbes CO₂/températures depuis 1850. Ce que j'ai bien entendu refusé en lui expliquant que cela induisait une relation de cause à effet qui est plus subtile que ça.

Hervé : Moi aussi, j'ai souvent été consulté par des journalistes qui voulaient présenter les courbes CO₂/températures l'une sur l'autre. Je leur ai conseillé de ne pas le faire en expliquant que cela pouvait prêter à une mauvaise interprétation... mais je sais qu'ils l'ont quand même fait au final !

Sylvestre : Oui et on les comprend, parce que bien évidemment il y a une sorte de désir de précision des scientifiques quand ils disent de ne pas mettre ces deux courbes ensemble, alors que par ailleurs ils nous disent que c'est l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère qui est le facteur principal de l'évolution climatique depuis 150 ans.

Isabelle : C'est vrai que ceux qui ont compris qu'une augmentation de CO₂ dans l'atmosphère signifiait une augmentation de température, ne voient pas pourquoi on ne peut pas superposer les deux courbes comme l'a fait Al Gore. Alors que, si j'ai bien compris, c'est simplement un problème de chronologie : par le passé, l'augmentation de CO₂ n'est pas le facteur déclencheur du changement climatique (il intervient avec un léger retard comme une rétroaction positive), alors qu'aujourd'hui c'est bien l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère qui est à l'origine du réchauffement climatique en cours ?

Jérôme : Oui et ce qu'il faut surtout retenir, à mon sens, des travaux qui ont été publiés sur cet aspect de l'évolution de la température comparée à l'évolution des gaz à effet de serre au cours du passé, c'est qu'à partir du moment où l'on a un réchauffement, on peut effectivement s'attendre à ce que le cycle du carbone et le cycle de l'azote nous rajoutent du CO₂, du méthane et du protoxyde d'azote dans l'atmosphère.

On discute toujours des mécanismes exacts responsables de ces émissions naturelles de gaz à effet de serre, mais c'est ce message-là que je préfère retenir des données obtenues dans les carottes de glace, plutôt que celui disant que ce sont les gaz à effet de serre qui changent le climat aux échelles de temps glaciaires-interglaciaires. Ils sont une composante parmi d'autres du changement climatique naturel. Aux échelles de temps glaciaires-interglaciaires, on sait que l'évolution de l'énergie reçue en moyenne sur toute la surface de la Terre pendant la rotation annuelle change très peu. Par contre, la redistribution saisonnière et spatiale change énormément. Et cette redistribution peut conduire à des comportements opposés entre les pôles : quand l'énergie solaire reçue en début d'été en régions boréales devient insuffisante pour faire fondre la neige hivernale et printannière, entraînant un début de glaciation dans l'hémisphère Nord, le phénomène inverse se produit dans l'hémisphère Sud car l'énergie solaire reçue augmente au même moment. Donc il faut un mécanisme qui fasse que les deux hémisphères répondent au même moment, et il n'y a pas trente-six mécanismes susceptibles de faire ça : c'est soit par l'océan, soit par les gaz à effet de serre. Quand on prend un modèle comme celui d'Hervé et qu'on le fait tourner avec les paramètres orbitaux calculés grâce à la mécanique céleste, avec 180 ppm de CO₂, avec 280 ppm de CO₂, avec l'étendue des calottes de glace et celle de la végétation qui modifie aussi l'albédo terrestre, on n'arrive à reproduire la glaciation-déglaciation qu'en prenant en compte les variations de gaz à effet de serre, sinon on n'y arrive pas. Dans l'état actuel des connaissances, on n'est pas capable de produire une déglaciation avec des gaz à effet de serre constants.

Sylvestre : Concernant les gaz à effet de serre, j'ai remarqué que certains climato-sceptiques évitent systématiquement de faire des projections sur les taux de gaz à effet de serre (en particulier le CO₂ et le méthane) dans le futur. Par exemple, dans *L'imposture climatique*, Claude Allègre ne parle pas une seule fois d'un taux de CO₂ de 500, 600, 700... ou 1000 ppm dans l'atmosphère, et quand il montre un graphique sur la concentration de CO₂, dans la légende du graphique on peut lire : « Courbe de Gore présentée au début de son film montrant les

variations de température et de CO₂ depuis 600 000 ans (la courbe de CO₂ a été extrapolée vers le futur pour impressionner !) ». Sauf que quand on regarde la courbe extrapolée, on arrive à 400 ppm, c'est-à-dire pratiquement le niveau auquel on est aujourd'hui – actuellement on est à 387 ppm. Donc Al Gore n'a finalement pas extrapolé de beaucoup.

Il y a donc deux éléments d'information, qui sont basiques sur le sujet et qu'il est important de maîtriser en ordre de grandeur si on veut réfléchir sur la question : tout d'abord, on a la certitude, parce qu'on l'a mesuré, que l'on n'est jamais allé au-delà de 300 ppm de CO₂ dans l'atmosphère dans les huit ères glaciaires-interglaciaires qui ont précédé ; et deuxième élément, on se dirige vers une atmosphère contenant 600 ppm, 800 ppm, 1000 ppm de CO₂ ou plus : on ne sait pas où ça va s'arrêter mais c'est déjà pratiquement dans les tuyaux ! Le dimensionnement du problème peut être donné simplement par ces deux ordres de grandeur, même s'ils ne sont pas extrêmement précis. Et le fait d'éviter systématiquement de mettre ça sur la table de la part de gens pour qui « tout ça c'est de la blague », est assez symptomatique à la fois de la faiblesse de leurs arguments et du fait qu'ils ne veulent simplement pas parler du problème. Du coup, ils ressortent inlassablement l'argument selon lequel « à l'époque il n'y avait pas plus de CO₂ et pourtant il faisait plus chaud », ce qui permet de semer le doute dans le grand public, à qui on a bien expliqué la corrélation entre l'augmentation de CO₂ et l'augmentation de la température.

Jérôme : C'est vrai et il faut le redire encore une fois : il n'y a pas que le CO₂. Il y a 130 000 ans, les conditions d'insolation étaient telles que pendant la période d'été au-dessus de l'océan Arctique, au-dessus du Groenland, on avait + 50 watts par mètre carré ! Pour situer, aujourd'hui le forçage anthropique lié aux gaz à effet de serre entre la période préindustrielle et 2010 n'est que de 2,5 watts par mètre carré. Alors évidemment, il y a l'effet symétrique dû à l'orbite terrestre, on avait – 50 watts par mètre carré en hiver ; mais en hiver aux pôles, ça ne change pas fondamentalement l'état du système, il n'y avait de toute façon pas de lumière et il faisait déjà froid ! Et le résultat, c'est qu'une bonne partie du Groenland s'est disloquée (il y a bien entendu

beaucoup de débats sur la quantité) et a augmenté le niveau des mers de peut-être 3 m. Peut-être aussi qu'une partie de l'Antarctique de l'Ouest s'est également disloquée et a contribué à l'augmentation du niveau des mers... Il y avait moins de CO₂ qu'aujourd'hui à cette époque, mais le CO₂ n'est pas tout.

Isabelle : Pourquoi les conditions d'insolation étaient-elles différentes il y a 130 000 ans ?

Jérôme : C'est de la pure mécanique céleste : les paramètres orbitaux de la Terre varient périodiquement à cause des anomalies gravitationnelles créées surtout par les planètes géantes, ce qui modifie le flux d'énergie solaire qu'elle reçoit en fonction de la saison et de la latitude et entraîne des changements climatiques.

Olivier : Je pense qu'il faudrait redire aussi simplement que si l'on parle de gaz à effet de serre c'est parce qu'ils contribuent à l'effet de serre existant. Autrement dit, si l'on accepte l'idée de l'existence d'un effet de serre, qui permet de maintenir une température moyenne à la surface de la Terre de l'ordre de 15 °C, on ne peut pas dire qu'une augmentation forte de la concentration de ces gaz à effet de serre n'a aucune conséquence.

Les travaux oubliés des spectroscopistes sur les gaz à effet de serre

Hervé : Le message implicite qui se dégage de la mise en exergue des débats sur les liens entre CO₂ et température dans le passé, c'est que la seule raison qui nous permet de quantifier le réchauffement lié à la vapeur d'eau, au CO₂ et aux différents gaz à effet de serre, ce sont précisément ces études des climats passés. C'est l'un des messages subliminaux – et parfois moins subliminaux – qui résultent de ces controverses : beaucoup de gens croient qu'il n'y a que ces corrélations pour étayer la physique des modèles. Alors que les modèles n'ont au contraire jamais utilisé dans la formulation de leurs équations, ni dans leurs données d'entrée, une seule des données issues des travaux de paléoclimatologie – qui sont là comme un outil de validation supplémentaire s'ajoutant à tout ce que l'on observe

du climat actuel et de ses fluctuations. En fait, il existe tout un corpus scientifique, qui est à la base de l'essentiel de ce que l'on sait sur l'effet de serre et qui reste très largement ignoré de tous les débats grand public. La communauté des spectroscopistes a calculé, mesuré pendant un demi-siècle au moins (tout ceci a commencé au XIX^e siècle) les raies d'absorption de toutes les molécules de l'atmosphère, et archivé ces résultats dans des bases de données (la base GEISA en France, par exemple) qui sont régulièrement entretenues et améliorées. Les calculs qui déterminent le taux de chauffage associés aux différents gaz à effet de serre sont donc effectués de manière très précise – et si les modèles climatiques sont obligés de ne refaire que des calculs simplifiés à chaque pas de temps, ces calculs sont donc calibrés sur des modèles radiatifs très détaillés. Si l'on mesure par ailleurs la température de l'atmosphère, sa teneur en vapeur d'eau et sa composition atmosphérique en autres gaz à effet de serre, on peut vérifier ces calculs, parce que l'on dispose à la fois d'instruments satellitaires qui mesurent le rayonnement atmosphérique dans des milliers de longueurs d'onde et aussi le rayonnement global, intégré sur tout le spectre solaire ou terrestre. En ignorant le rôle de la science du rayonnement atmosphérique, on ignore plusieurs décennies d'une science très riche, très technologique, qui a impliqué des dizaines de milliers de personnes et qui est à l'origine des premières interrogations sur les risques liés aux gaz à effet de serre.

Jérôme : Là on revient sur les éléments que certains climato-sceptiques remettent en question. En fait, il y a toute une gradation de l'argumentation climato-sceptique, qui démarre au degré zéro : «L'effet de serre n'existe pas». On peut citer ce papier de mathématiciens allemands circulant régulièrement dans les blogs, qui démontreraient que l'effet de serre viole les lois de la thermodynamique!¹ Cet article a été réfuté dans la même revue récemment².

1. G. Gerlich and R. D. Tscheuschner, «Falsification of the atmospheric CO₂ greenhouse effects within the frame of physics», *International Journal of Modern Physics B*, vol. 23, 2009, pp. 275-364
2. J.B. Halpern, C.M. Colose, C. Ho-Stuart, J.D. Shore, A.P. Smith and J. Zimmermann, «Comment on Falsification of the atmospheric CO₂ greenhouse effects within the frame of physics», *International Journal of Modern Physics B*, vol. 24, 2010, pp. 1309-1332.